

Karakterizacija jednodimenzionalnog pozicijski osjetljivog detektora ionskom mikroprobom

Seminarski rad

Luka Čulo*

Fizički odsjek, Prirodoslovno-matematički fakultet, Bijenička 32, Zagreb

dr. sc. Zdravko Siketić, mentor

Institut Ruđer Bošković, Bijenička 54, Zagreb

(Datum: 20. siječnja 2023.)

U ovom radu vršimo karakterizaciju Sitek S-0341 (1L2.5UV_CP2_NW) jednodimenzionalne PSD diode s ciljem određivanja podatnosti korištenja iste u eksperimentalnim tehnikama koje uključuju raspršenja ionskog snopa na materijalima. Dobivena je prostorna rezolucija (FWHM) $(45.89 \pm 0.70) \mu\text{m}$ te energijska rezolucija (bez uklonjenog šuma postava) od 130 keV na energijama 5000-6000 keV. Opažene su neke karakteristike u transportnim svojstvima.

I. UVOD

U eksperimentalnim tehnikama raspršenja iona na materijalima, kako bi prikupili dovoljnu statistiku, a sa što kraćim izlaganjem mete zračenju, željeli bismo postaviti energijski detektor što bliže meti. Međutim, tada nailazimo na sljedeći problem: detektor pokriva veći prostorni kut, a to znači da kut raspršenja više nije dobro definiran pa je samim tim je i energijska raspodjela opaženih čestica proširena. Kako bi izbjegli proširenje u energiji možemo udaljiti energijski detektor od mete, ali tada gubimo tok čestica i produljujemo trajanje eksperimenta. Drugo rješenje je upotreba pozicijski osjetljivih detektora (eng. Position Sensing Detector, PSD). Takav detektor osim energije upadne čestice može odrediti i njenu poziciju upada na detektor. Poznavanje pozicije upada nam omogućava određivanje kuta raspršenja.

Cilj ovog rada je određivanje karakteristika jedne takve jednodimenzionalne PSD diode radi utvrđivanja mogućnosti korištenja iste u eksperimentima analize materijala ionskim snopom. U radu ćemo također, ukratko, opisati princip rada PSD dioda. U trećem poglavlju je opisan eksperimentalni postav te eksperimentalne metode korištene u određivanju prostorne i energijske

* luka.culo@student.pmf.hr

rezolucije, strujno-naponskih karakteristika. U četvrtom poglavlju su izloženi rezultati mjerenja, pripadna analiza te diskusija.

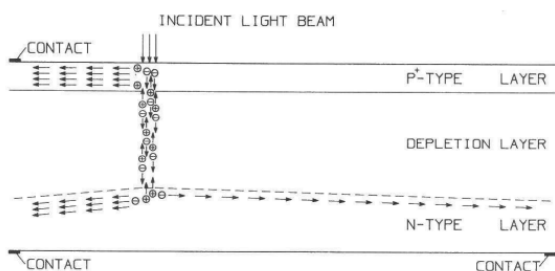
II. POZICIJSKI OSJETLJIVI DETEKTORI (PSD)

Općenito, pozicijski osjetljivi detektori su podgrupa poluvodičkih detektora koji imaju mogućnost detektirati poziciju upada čestice. Dijelimo ih na dvije vrste s obzirom na način na koji se određuje položaj: diskretne i kontinuirane. Diskretni su napravljeni od polja nezvisnih poluvodičkih elemenata koji sam za sebe bilježe upad čestice. Prostorna rezolucija im ovisi o veličini pojedinog elementa, ali pokazuju bolju energijsku razlučivost od kontinuiranih. Kontinuirani, s druge strane, za određivanje položaja koriste otpornu podijelu naboja. U oba slučaja postoje jednodimenzionalne i dvodimenzionalne izvedbe.



Slika 1. Detektorska dioda SiTek S-0341 (1L2.5UV_CP2_NW).[2]

II.1. Jednodimenzionalni kontinuirani PSD



Slika 2. Shematski prikaz rada p^+n pozicijski osjetljive diode. Struja se dijeli ovisno o mjestu upada zračenja.

[1]

Prostorna rezolucija im ovisi o veličini pojedinog elementa, ali pokazuju bolju energijsku razlučivost od kontinuiranih. Kontinuirani, s druge strane, za određivanje položaja koriste otpornu podijelu naboja. U oba slučaja postoje jednodimenzionalne i dvodimenzionalne izvedbe.

Radi jednostavnosti uzmimo p^+n spoj velikih dimenzija prikazan na slici 2. Savršeno uzak snop zračenja upada okomito na sloj p^+ -tipa. U zoni osiromašenja upadna čestica deponira svu svoju energiju u obliku stvaranja elektron-šupljina parova. Vrlo brzo veliki dio stvorenih parova se razdvoji jakim elektrostat-
skim poljem u zoni osiromašenja. Dolazak razdvojenih šupljina u p^+ -tip odnosno elektrona u n -tip, zbog rekombinacije s manjinskim nosiocima, uzrokuje nagli pad potencijala na mjestu prolaska upadne čestice. Pretpostavimo li da je p^+ -tip tako konstruiran da je potencijal zadan potencijalom na pripadnoj elektrodi, onda je očito u n -tipu nastala razlika potencijala između elektroda i mjesta prolaska čestice. Nastali potencijal će uzrokovati gibanje elektrona od tog mjesta prema elektrodama na n -tipu. Također, ako se elektrode nalaze na istom potencijalu onda će se broj elektrona, drugim riječima struja podijeliti proporcionalno provodljivosti do elektrode. Pro-

vodljivost je funkcija udaljenosti pa će tako put do bliže elektrode imati veću provoljivost te će veći broj elektrona otići na tu elektrodu. Zbog toga što se u n -tipu događa dijeljenje struje s obzirom na otpor, taj sloj zovemo rezistivnim slojem. Dakle, pozicijski osjetljiv detektor možemo tretirati kao potencijometar na čiju sredinu dolazi generirana struja.

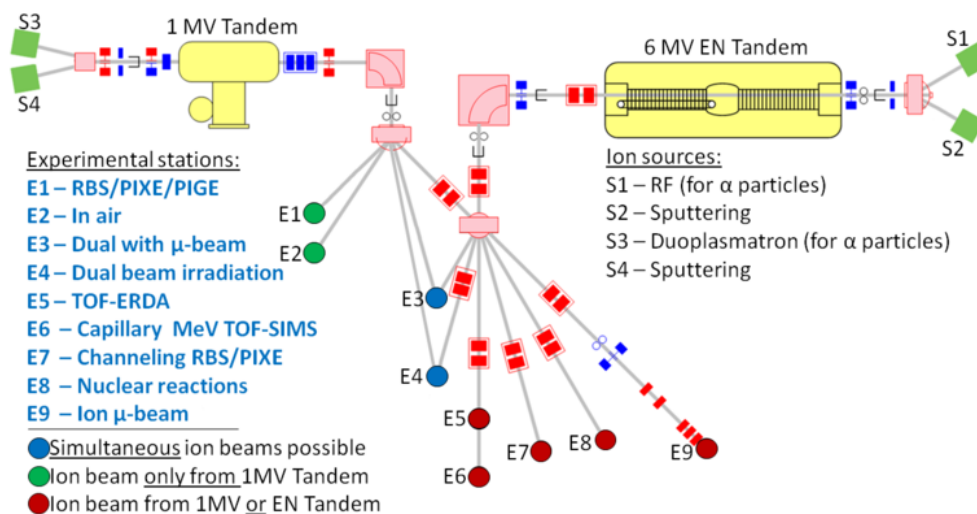
U ovom radu promatran je jednodimenzionalan kontinuirani PSD S-0341 (1L2.5UV_CP2_NW) tvrtke SiTek.[2] Dolazi u keramičkom DIL 14 pinskom pakiranju kako je prikazano na slici 1. Dizajniran je kao nuklearni tip uz povećanu osjetljivost na UV područje.

III. EKSPERIMENTALNI POSTAV I METODE MJERENJA

U eksperimentu i mjerenjima za ovaj rad korišteni su eksperimentalni postavi Laboratorija za interakciju ionskih snopova pri Institutu Ruđer Bošković.

Sva su mjerenja zapisana u datoteke te su kasnije obrađena koristeći programe napisane u *Python*-u.

III.1. Akceleratori sustav. Ionska mikroproba



Slika 3. Shema akceleratori sustava i eksperimentalnih linija pri Laboratoriju za interakcije ionskih snopova Instituta Ruđer Bošković.[3]

Prikazano na slici 3 je shema laboratorijskog akceleratori sustava i eksperimentalnih linija. Postav se sastoji od dva elektrostatska akceleratora, 6.0 MV HVEC EN Tandem Van de Graaff i manjeg 1.0 MV HVE Tandetron-a, te 9 eksperimentalnih linija označenih s E1-E9 na slici 3. Ioni

raznih vrsta (H, He, Li, C, Si, Cl, Cu, Au, itd.) dobivaju se iz jednog od 4 ionska izvora: po jedan raspršivački (eng. sputtering) za svaki akcelerator (S2 i S4 na slici 3), duoplazmatron na Tandetronu te radiofrekventni Alphasross na Tandem VdG-u za dobivanje He iona (S3 i S1 na slici 3).

Mjerenja iznesna u ovom radu su dobivena na ionskoj mikroprobi (E9 na slici 3) koristeći 2 MeV snop protona dobiven iz Tandem Van de Graaff akceleratora. Negativni ioni vodika se dobivaju iz raspršivačkog ionskog izvora (SNICS-40) koje visoki pozitivan potencijal ubrzava prema sredini akceleratora. U sredini akceleratora, pomoću rijetke mješavine tzv. *stripper* plina (CO_2 i N_2), ioni izgube dva ili više elektrona i sada pozitivni ioni pod utjecajem visokog pozitivnog potencijala bivaju ubrzani prema izlazu iz akceleratora (tandem učinak). S obzirom da skidanje elektrona je stohastičko po prirodi i prati neku statistiku pa tako i na izlazu dobivamo snop distribucije iona različitog naboja i energija. Snop "pravog" naboja i energije se dobiva primjenom Lorentzove sile u analizatorskom elektromagnetu gdje se snop zakreće za 90° i gdje će ioni ovisno o energiji i naboju pratiti različite putanje. Filtriran snop tada ulazi u tzv. *switching* magnet u kojemu se preusmjerava prema odabranoj eksperimentalnoj liniji, u našem slučaju ionskoj mikroprobi.

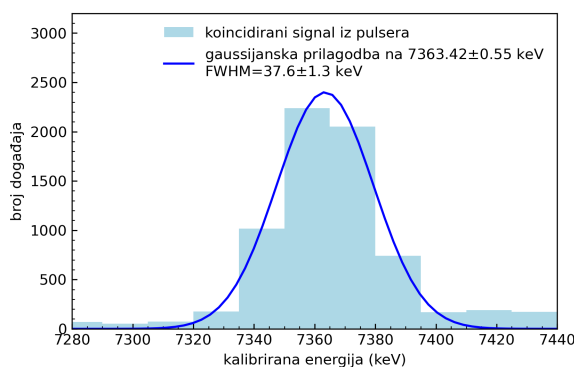
Na putu prema komori ionske mikroprobe, snop se prvo sažima objektnim pukotinama, a nakon toga i kolimira kolimatorskim pukotinama. Struja snopa se gubi što se snop više definira pukotinama (visokostrujni način preko 1 pA i niskostrujni način do 10 fA za mikrometarski snop). Snop zatim ulazi u sustav 3 kvadrupolna elektromagneta (dubletna ili tripletna konfiguracija ovisno o rigidnosti iona u snopu) gdje se sažima na mikrometarsku točku u komori ionske mikroprobe. Prije sustava magneta za sažimanje postoji dva para zakretnih magneta koji omogućuju zakretanje snopom u dvije dimenzije. Kontrola zakretnih magneta se vrši na računalo iz *Spector*-a, a prostorna skala se zadaje pojačanjem na pojačalu spojenom na magnete. Slika skena se bilježi u mapi piksela dimenzije $m \times n$ (u našem slučaju 128×128 piksela), a područje skeniranja na najvećem pojačanju iznosi oko 1 mm^2 . Postoji dvije vrste slika ovisno što predstavlja pojedini piksel: *IBIC* mapa gdje piksel prikazuje prosječnu visinu signala za tu točku u skenu te *count* mapu koja prikazuje broj zabilježenih događaja po točki u skenu.

III.2. Proces mjerenja

III.2.1. Mjerenje energijskog spektra alfa izvora

Prije samog početka rada na ionskoj mikroprobi bilo je potrebno odrediti neke parametre detektora koji će biti korišteni. U prvom setu mjerenja pronalazimo optimalne parametre elektroničkih lanaca za obradu signala te također određujemo zaporni napon. Oboje određujemo mjerenjima energijskog spektra trostrukog alfa izvora (Pu-238, Am-241, Cm-244) u pomoćnoj vakuumskoj komori. Detektor je spojen na sljedeći način: Signale s prednjih elektroda (anoda) dovodimo na ulaz dva nezavisna nabojno osjetljiva predpojačala dok je zadnja elektroda (katoda) uzemljena. Naboj iz detektora, generiran upadnom česticom, sakuplja se u predpojačalima, a preko istih se na detektor postavlja zaporni napon. S obzirom da prednje elektrode za danu diodu moraju biti na negativnom potencijalu u odnosu na katodu, postavljaju se *negativni* zaporni naponi istoga iznosa. Nakon predpojačala signali prolaze dodatno oblikovanje i pojačanje u pojačalima iz kojih se dalje vode na dva kanala ADC-a gdje se otklanja šum na način da se samo signali koji prelaze određen prag pretvaraju u logičke (digitalne) signale. ADC je preko višekanalnog analizatora spojen na računalo na kojemu se u programskom paketu *Spector* provodi sakupljanje podataka u 10-bitnoj rezoluciji (1024 kanala).

Osim što u *Spector*-u bilježimo visine signala bilježimo i vrijeme njihovog dolaska. Taj podatak smo koristili prilikom izdvajanja koincidiranih događaja gdje je uzet vremenski prozor od $0.1 \mu\text{s}$. Dakle, signale s anoda smatramo koincidentnim ako jedan u odnosu na drugi zakasni najviše $0.1 \mu\text{s}$. Tada, zbrajanjem visine signala koincidiranih događaja dobivamo ukupnu energiju upadne čestice, $E \propto I_1 + I_2$. Radi se kalibracija tako dobivenog energijskog spektra, tj. pripadne skale linearnom prilagodbom izmjerenih pozicija vrhova s poznatim energijama alfa čestica iz danog alfa izvora. Tako dobiveni kalibrirani energijski spektar omogućuje nam određivanje nepoznate energije detektiranih čestica, ali i energijske rezolucije na već poznatim kalibracijskim vrhovima.



Slika 4. Kalibrirani energijski spektar koincidiranih događaja pulsera. Dobiven je šum razine ≈ 40 keV na energiji ≈ 7360 keV ili 0.5%. Postav s

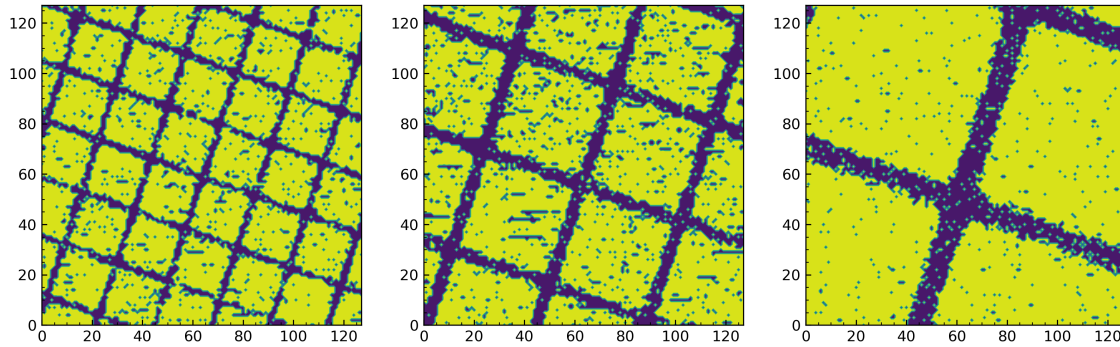
Prije i nakon mjerenja učinjena je relativna kalibracija elektroničkih lanaca pomoću pulsera, uređaja koji proizvodi signal dobro definirane visine. Spaja se na *test* ulaz na predpojačalima te se bilježe dobiveni spektari. Ugađajući pojačanja na pojačalima, kalibriramo elektroničke lance dobivanjem vrha pulsera na istom kanalu ADC-a u oba spektra. Iz zabilježenog združenog spektra pulsera dobivamo i ukupnu razinu šuma u elektroničkim lancima. Na slici 4 nalazimo spektar pulsera kao sumu koincidiranih signala iz elektroničkih lanaca lijeve i desne anode. Dobiivena je FWHM od 37.6 ± 1.3 keV na energiji 7363 keV što je posve očekivana vrijednost šuma u elektroničkim lancima. Energijska skala je kalibrirana najintenzivnijim energijama alfa izvora za zaporni napon -9 V.

III.2.2. Prostorna i energijska rezolucija

U drugom setu mjerenja promjenjena je struktura mjernog postava kao posljedica odluke da se umanjiti mogućnost uvođenja nepreciznosti kroz fluktuacije u nezavisno narinutim zapornim naponima. Tako da je sad postavljen *jedan jedinstven pozitivan* zaporni napon na katodu detektora, a anode su uzemljene preko predpojačala tako da je *bias* ulaz predpojačala kratko spojen. Kako bi se to izvelo, dodan je i treći elektronski lanac za katodu. U prvom setu mjerenja odredili smo poziciju platoa u efikasnosti sakupljanja naboja na detektoru. Slijedom toga na zadnju elektrodu narinut je zaporni napon od +10 V.

Detektor je smješten u vakuumsku komoru ionske mikroprobe, direktno u fokalnu ravninu snopa. Kako bi dodatno utvrdili da postav funkcionira i provjerili prisutnost elektroničkih šumova, u komoru je dan ranije zajedno s detektorom postavljen isti alfa izvor iz prvih mjerenja te je pokrenuta 16.5-satna ($\approx 6 \cdot 10^4$ s) akvizicija. Osim za provjeru postava, ovo mjerenje koristimo i za određivanje energijske rezolucije detektorske diode zbog velike prikupljene statistike.

Kako ne bi došlo do oštećenja, snopom se skenira preko velike površine detektora. Prvo su napravljena mjerenja u najvećoj skali (pojačanje 10x1, 10 grubo, 1 fino) kako bi se dobila mikrometerska snimka detektora. Snimka je napravljena za signal iz svake od elektroda spajanjem IBIC mapa tri skenirana područja (128×128 piksela) koincidiranjem signala iz lijeve (ADC2) anode. Snimke s kalibriranim osima su prikazane na slici 11. Zatim se detektor *xyz stage*-om postavlja tako da snop upada otprilike po sredini detektora. Na tom položaju su napravljene skenove 128×128 piksela u 4 različite skale dane pojačanjima 10x1, 2x1, 1x1 i 0.5x1. Iz podataka tih mjerenja iz detektora radimo rekonstrukciju položaja snopa na detektoru. Ponovno izdvajamo koincidentne



Slika 5. Snimka mrežice u energijskom detektoru (600 mesh, 600 zarezova po inču) u tri različite skali skeniranja otprilike $243 \times 243 \mu\text{m}^2$ (2x1), $128 \times 128 \mu\text{m}^2$ (1x1) te $65 \times 65 \mu\text{m}^2$ (0.5x1). Osi su u pikselima.

dogadaje lijeve i desne anode te računamo položaj upada iona prema formuli

$$\frac{x}{L} = \frac{1}{2} \frac{I_1 - I_2}{I_1 + I_2} \quad (1)$$

gdje su I_1 i I_2 visine signala iz desne odnosno lijeve anode te je L duljina pozicijski osjetljivog područja detektora. Iako znamo iz podataka proizvođača da je osjetljivo područje detektora ima dimenzije $2500 \times 600 \mu\text{m}^2$ (pozicijski osjetljiva je duža dimenzija), L određujemo naknadno jer ne znamo unaprijed koliki dio aktivnog područja je pozicijski osjetljivo.

Za kalibraciju prostorne skale koristi se konvencionalni SSB energijski detektor s kojim je skenirana metalna mrežica (600 zarezova po inču, 600 mesh). Žičice koje čine mrežu djelomično absorbiraju energiju iona koji prođe kroz njih pa je prema tome moguće izdvojiti ione koji su prošli direktno kroz rupe u mrežici. Na slici 5 se nalaze tri brojne mape mrežice u tri različite skale skeniranja. Iz dobivenih snimki je određen period ponavljanja (eng. pitch) za koji znamo da iznosi $42 \mu\text{m}$.

Tablica I. Podaci za kalibraciju prostorne skale skena na ionskoj mikroprobi. Za skalu 10x1 podaci su ekstrapolirani iz ostalih.

Skala	Razmak piksela ($\mu\text{m}/\text{px}$)	Širina 128px skena (μm)
0.5x1	0.5089 ± 0.0020	64.63 ± 0.26
1x1	1.009 ± 0.010	128.2 ± 1.3
2x1	1.911 ± 0.028	242.7 ± 3.5
*10x1	*9.779	*1241.9

U tablici I nalaze se podaci kalibriranih skala. U drugom stupcu je razmak između susjednih piksela, a u trećem je širina 128 pikselnog, tj. cijelog skena. Zbog gotovo nikakve razlike u x - i y - skali, koja iznosi najviše 0.8%, uzeto je da je sken izotropan. Podatke za skalu 10x1 nije bilo

moguće dobiti iz mrežice (period je 4 piksela, a šum na razini 1-2 piksela). Tu smo skalu kalibrirali ekstrapolirajući podatke iz ostalih skala. Kako se može uočiti iz tablice I sa skalom 0.5×1 idemo u rezoluciju od manje od 1 mikrometra pa je moguće odrediti širinu snopa iz nagiba na žicama. Dobiveni su FWHM širine snopa te iznose $(0.94 \pm 0.30 \mu\text{m})$ u x-smjeru i (0.73 ± 0.30) u y-smjeru.

Duljinu L u jednadžbi 1 računamo kalibriranjem prostorne skale detektora poznavajući širinu skena iz tablice I i rekonstrukcijom skena u detektoru.

III.2.3. Strujno-naponske karakteristike

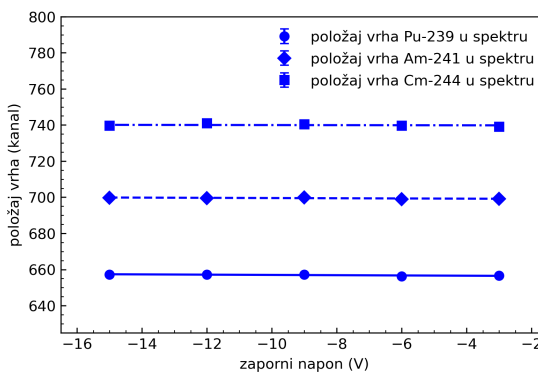
Radi dobivanja potpunije slike detektora izmjerili smo strujno-naponsku karakteristiku metodom dva kontakta između lijeve anode i katode te desne anode i katode. Mjerenja su vršena pomoću *Keithley*-evog pikoampermetra s ugrađenim naponskim izvorom u računalnom načinu rada što nam je omogućilo kontrolu i bilježenje podataka na računalu. Ovo mjerenje je potaknuto uočavanjem razlike u pojačanju signala koji dolaze s različitih anoda pri istim postavkama pripadnih elektroničkih lanaca.

IV. REZULTATI I DISKUSIJA

IV.1. Ovisnost visine signala o zapornom naponu

Dioda je stavljena u pomoćnu vakuumsku komoru, a pred nju je stavljen trostruki alfa izvor (Pu-239, Am-241, Cm-244). Korišten je postav s dva elektronička lanca gdje dovodimo bias nezavisno na dvije anode. Mjeren je energijski spektar za različite zaporne napone.

Prvo je uočeno da su signali na jednoj od elektroda upola manji nego na drugoj uz isto pojačanje elektroničkih lanaca koji su prethodno bili kalibrirani pulserom. S tim na umu se radila i obrada. To znači da se bez korekcije nisu mogli dobiti vrhovi u sumi koincidencija. Tek kad se postavi korekcija u smislu reskaliranja 'slabije' elektrode proizlaze dobro definirani gaussijanski vrhovi u spektru koincidiranih signala. Faktor korekcije je određen identifikacijom jedva vidljivih vrhova u oba spektra i iznosi



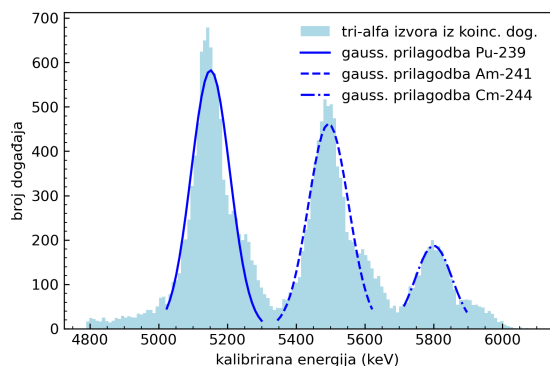
Slika 6. Ovisnost položaja vrhova u spektru trostrukog alfa izvora o narinetom zapornom naponu.

oko 2.20 (zbog slabe statistike analiza napravljena očitanjem kanala). Pojava tih vrhova je objašnjena s nelinearnostima blizu samih kontakata jer se tada sav generiran naboj upadom čestice sakupi na samo toj elektrodi. Spektri su snimljeni za pet Na svaki od 3 vrha u nekalibriranom spektru radi gausijanska prilagodba. Rezultati su prikazani na grafu 6. Postoji zanemariv rast, unutar statističke pogreške, s apsolutnom vrijednošću zapornog napona. Zaključujemo, postignuta je najveća efikasnost sakupljanja tj. da visina signala predstavlja ukupnu deponiranu energiju.

IV.2. Energijska rezolucija

Detektorska dioda je sad postavljena u komoru ionske mikroprobe u fokalnu ravninu snopa. Detektor je spojen na postav s 3 elektronska lanca, za svaku od elektroda, a na stražnju elektrodu (katodu) je postavljen zaporni napon od +10V. Anode su uzemljene. Pred detektor je postavljen isti trostruki alfa izvor.

Nakon više od 16 sati sakupljanja dobiveni su energijski spektri na slikama 7 i 8. Energijski spektar na slici 7 je dobiven sumom visina koincidentnih signala iz dvaju anoda. Ponovno, zbog razlike u pojačanju između anoda trebalo je visine signala iz 'slabije' anode korigirati. Faktor korekcije je ovoga puta dobiven iz prilagodbe gausijanskog profila na vrhove u odvojenim spektrima. Dakle, faktor razlike pojačanja u signalima iznosi 2.2762 ± 0.0036 .



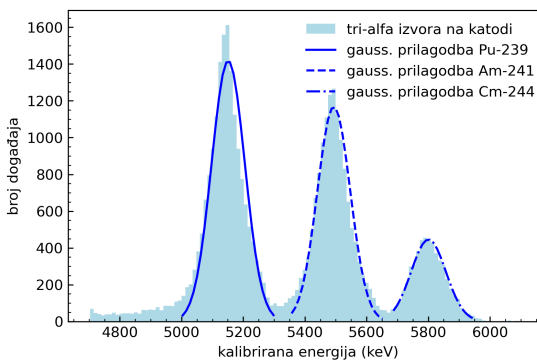
Slika 7. Kalibrirani energijski spektar trostrukog alfa izvora rekonstruiran iz sume koincidiranih signala u anodama. FWHM širina vrhova iznosi oko 130 keV.

Određena je energijska rezolucija detektora kao FWHM širina vrhova u spektru alfa izvora. Na energiji 5155 keV vrh Pu-239 ima širinu (132.7 ± 7.1) keV što je 2.58%, vrh Am-241 na energiji 5486 keV ima širinu (137.8 ± 6.3) keV odnosno 2.51% te vrh Cm-244 na energiji 5805 keV ima širinu (126.4 ± 4.7) keV što se svodi na 2.178%. Ista je analiza provedena i za energijski spektar dobiven od signala iz katode. Valja primjetiti, da zato što se detektor ponaša kao potencijometar ukupna energija bi trebala biti

dana signalima iz katode odnosno očekujemo oštre vrhove. To se vidi i iz slika 7 i 8 koje prikazuju poprilično slične spektre izuzev broja događaja. Može se uočiti razlika u bazi gausijanskih vrhova

koja vjerojatno proizlazi iz problema s asimetrijom lijeve i desne anode. Gaussijanska prilagodba na slici 8 je dala sljedeće širine: (126.8 ± 4.2) keV ili 2.462% za vrh Pu-239, (125.7 ± 3.2) keV ili 2.288% za vrh Am-241, (132 ± 2.3) keV ili 2.292%.

U ovom setu mjerenja nemamo snimljen spektar pulser kako bi odredili šum po elektroničkim lancima pa su dane širine uvećane za taj šum. Pokazalo se u prvom setu mjerenja da je šum iznosio oko 40 keV pri 7300 keV energiji. Pretpostavimo li da se razina elektroničkog šuma nije puno promijenila u odnosu na prvi postav možemo zaključiti da ovaj PSD detektor ima energijsku rezoluciju u razini 120 keV pri energijama 5150-5800 keV što je u relativnim jedinicama 2-2.5%. Takva rezolucija je zadovoljavajuća za ovu vrstu detektora.

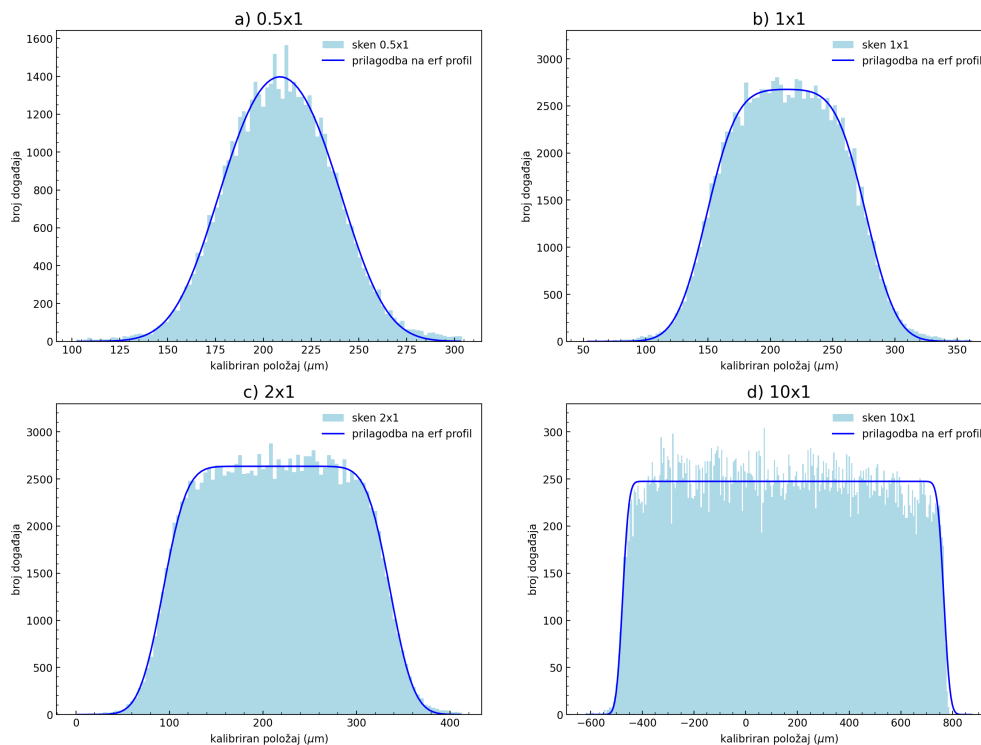


Slika 8. Energijski spektar trostrukog alfa izvora iz signala na katodi.

IV.3. Prostorna rezolucija

Detektor je u komori ionske probe spojen na postav s tri elektronička lanca. U ovom setu mjerenja je odlučeno da se podigne pojačanje za 2 puta na desnoj elektrodi (ona koja je imala manji signal). Snopom 2 MeV protona skeniramo detektor.

U prva tri mjerenja smo napravili sken po cijelom detektoru te je pospajana mapa prikazana na slici 11. Iz mapa se vidi da je, uz ovaj postav, efektivna duljina detektora sposobnog za određivanje pozicije nešto više od $1600 \mu\text{m}$. Spomenuta elektroda koja ima relativno manji signal u odnosu na drugu se nalazi na lijevoj strani mapa te je njena mapa (iz signala prikupljenih na njoj) najgornja. Na njoj je uočljiv nagli pad srednje amplitude u području 200 do 900 mikrona. Ista stvar je vidljiva na mapi 3. Prilikom obrade mjerenja primjećeno je da je za tu mapu vrh ukupne energije značajno širi od ostalih te se ne poklapa po energiji s predhodne dvije mape. Daljnjom analizom pronađeno je da se energija snopa smanjivala linearno u vremenu, neovisno o poziciji na detektoru. Razlog tome je autoru nepoznat; možda problem u kontroli snopa u akceleratoru? Da razlog ne leži u mjernom postavu pokazuje linearnost u opadanju, pogađa sva tri elektronička lanca istovremeno i na jednak način. Na drugoj mapi, srednjoj na slici 11, gdje je prikazana prostorna distribucija visine signala izmjerena na lijevoj elektrodi, možemo uočiti malo smanjenje signala



Slika 9. Histogrami rekonstruirane pozicije u detektoru za sekenove na sredini detektorske diode. Vidljiv je vrlo jasan erf rub u sve četiri skale skeniranja.

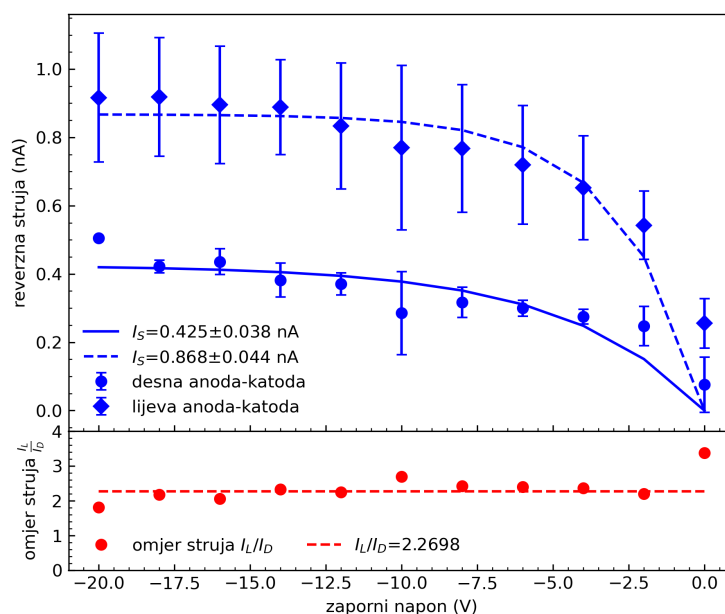
zbog mrtvog sloja oko kvadratnog kontakta. Ista se stvar na desnoj anodi ne vidi upravo zbog lošijeg mjerenja. Gradijent boje također prikazuje odličnu neovisnost o y -osi što je i jedna od glavnih odlika jednodimenzionalnih PSD-ova.

Slijede skenovi na sredini diode. Energija snopa je sada ustaljena, ali manja nego kada smo počeli s prvim mjerenjima. Prostornu smo rezoluciju računali rekonstruiravši sken u detektoru prema formuli 1 (uz korekciju od 1.13 zbog umjetno postavljenog 2x pojačanja). Histogrami skenova u sve četiri navedene prostorne skale su prikazani na slici 9. Ono što se vidi je lijevo-desno i jako dobro definirani erf profili. Prilagodbe su dale konzistentne podatke za sva četiri skena, izuzev pozicije centra kod 10x1. Dobivene su sljedeće vrijednosti za FWHM rezoluciju: $(44.4 \pm 1.9) \mu\text{m}$ (0.5x1), $(45.4 \pm 1.1) \mu\text{m}$ (1x1), $(47.0 \pm 1.1) \mu\text{m}$ (2x1) te $(44.7 \pm 3.3) \mu\text{m}$ (10x1). Sve zajedno za prostornu rezoluciju FWHM dobiveno je da iznosi $(45.89 \pm 0.70) \mu\text{m}$. Paralelno rezoluciji dobivena je i efektivna duljina detektora $L = (2057 \pm 14) \mu\text{m}$. To znači da je 83% detektora pozicijski osjetljivo, ali ne nužno i linearno. Linearni dio je nešto manji. Rezoluciju možemo i izraziti preko porasta na rubu od 10% do 90% maksimuma na histogramu. Tako izražena rezolucija iznosi $(49.94 \pm 0.77) \mu\text{m}$. Dobivena prostorna rezolucija je iznimno zadovoljavajuća u iznosu od otprilike

2.4% pozicijske osjetljivosti (zanimljivo da su i energija i pozicija razlučeni na oko 2.5%).

Kako je motivacija ove karakterizacije, upotreba detektora u raspršivačkim eksperimentima, valja pogledati kako se pozicijska rezolucija na detektoru odnosi na kutnu. Na primjer, ako se meta nalazi na 10 mm od detektora, detektor tada hvata raspon od oko 11.7° uz kutno razlučivanje od 0.3° .

IV.4. Strujno-naponska karakteristika (područje zapiranja)



Slika 10. Strujno-naponske karakteristike pojedinog para anoda-katoda u području zapiranja.

Za kraj je napravljeno mjerenje strujno-naponske karakteristike parova anoda-katoda. Izmjerene karakteristike su prikazane na grafu 10. Za ohmski kontakt se očekuje linearna ovisnost, a ista nije dobivena. Zato je napravljena prilagodba na reverzni oblik Shockley-eve jednadžbe za idealnu diodu. Rezultantne struje zasićenja su (0.425 ± 0.038) nA te (0.868 ± 0.044) nA za desnu odnosno lijevu anodu. Kao što je već viđeno u energijskim spektrima, postoji asimetrija lijevo-desno i dobivamo onaj isti faktor za prosječan omjer $I_L/I_D \approx 2.27$. Ovo nam sugerira da je podrijetlo asimetrije sadržano u samim elektrodama odnosno izvedenim kontaktima. Naime, da je do toliko nehomogenog otpornog sloja, vidjeli bi značajne nelinearne pojave u energijskim i pozicijskim spektrima. Štoviše, do na faktor asimetrije dioda pokazuje jako dobre značajke.

V. ZAKLJUČAK

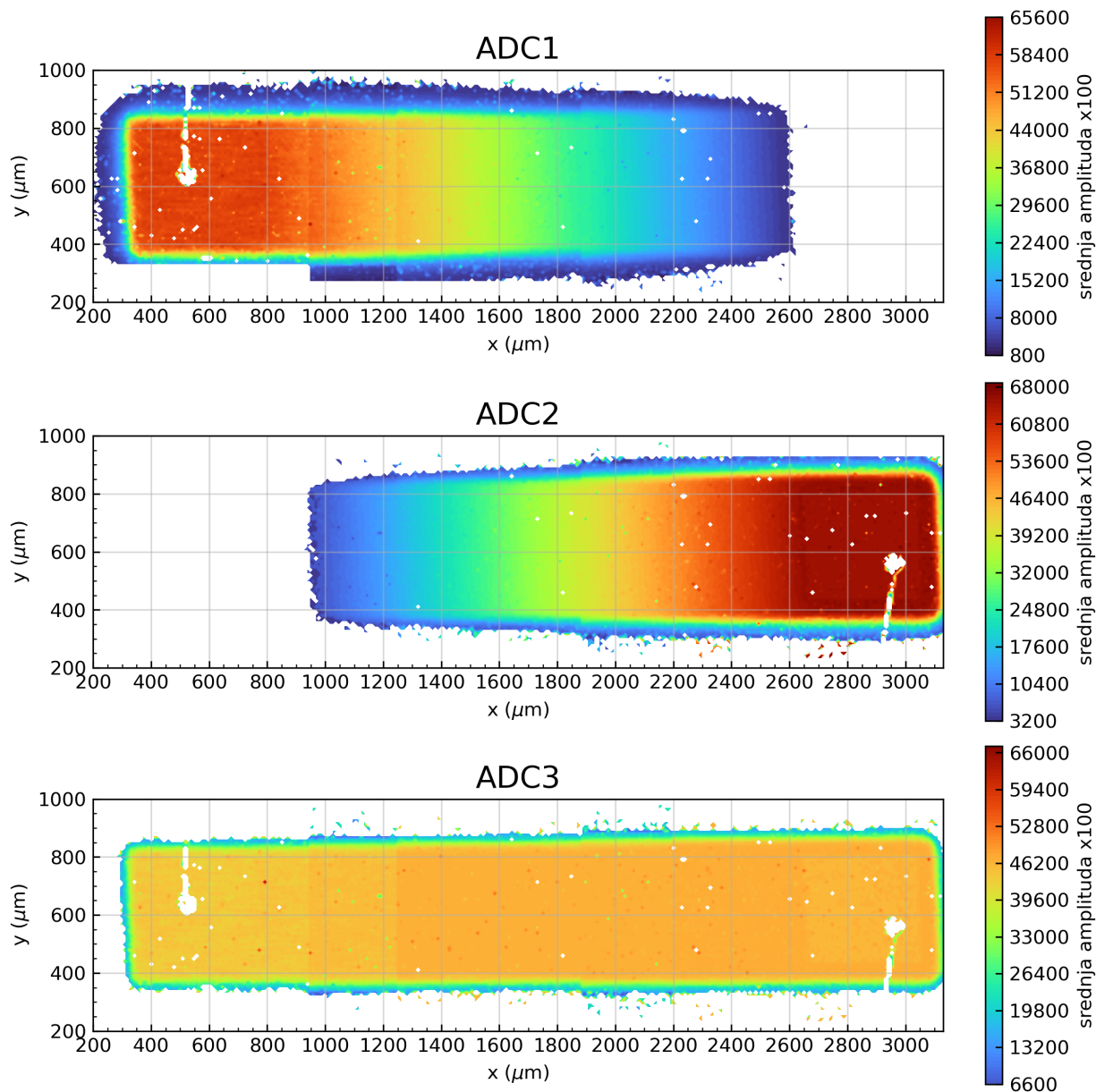
U ovom radu smo napravili karakterizaciju PIN pozicijski osjetljivog detektora. Izmjerena mu je prostorna rezolucija (FWHM) od $(45.89 \pm 0.70) \mu\text{m}$ i energijska rezolucija za energije alfa čestica 5100-5800 keV, od 125-132 keV. Uočena je asimetrija između anoda, tj. desna anoda (pin 5) daje signale manje za faktor 2.2762 ± 0.0036 od lijeve anode (pin 12). Kako na raspolaganju imamo samo jedan takav detektor, nismo u mogućnosti reći je li primjećena asimetrija defekt proizvodnje ili je nužno zlo nekog dizajna. Također, detektor je možda oštećen na neki način, ali dokazuje za takvo što nismo našli. Isti problem smo pronašli u strujno-naponskoj karakteristici gdje su također uočene osobine loših ohmskih kontakata. Ipak, zaključujemo da je detektor dovoljno dobar za korištenje u eksperimentima s raspršenjem iona uz obraćanje posebne pažnje na pravilnu kalibraciju diferencijalnog pojačanja. Za određivanje linearnosti bilo bi potrebno učiniti dodatnu analizu.

ZAHVALE

Htio bih izraziti zahvalnost mentoru Zdravku Siketiću na vremenu iskazanom kako bi mi omogućio napraviti seminar. Također, bi se htio zahvaliti Andreu i Matiji na pomoći prilikom izvođenja eksperimenta.

-
- [1] D.J.W. Noorlag, *Lateral-photoeffect position-sensitive detectors*, doktorski rad, TU Delft (1982)
<http://resolver.tudelft.nl/uuid:0fe8da2a-f576-4c82-a483-510ce38d50bb>
- [2] *SiTek One-dimensional PSDs* <http://www.sitek.se/1d.htm>
- [3] *Eksperimentalne linije Laboratorija za interakcije ionskih snopova IRB-a*
<https://www.irb.hr/Zavodi/Zavod-za-eksperimentalnu-fiziku/Laboratorij-za-interakcije-ionskih-snopova/Clanci/Eksperimentalne-linije/>
- [4] *Table 3, Alpha Particle Energies*, Wiley (1999)
<https://application.wiley-vch.de/books/info/0-471-35633-6/toi99/www/decay/table3.pdf>
- [5] W. R. Leo, *Techniques for Nuclear and Particle Physics Experiments*, 2nd revised, Springer-Verlag, 1994.

Dodatak A: Snimka detektora



Slika 11. IBIC mape detektora za signale iz svake elektrode: desne anode (ADC1), lijeve anode (ADC2) te katode (ADC3). Slika je zrcaljena lijevo-desno i gore-dolje tako da se desna anoda (ADC1) nalazi na lijevoj strani snimki, a lijeva anoda (ADC2) na desnoj strani snimki. Na srednjoj snimci se u okolici kontakta može vidjeti kvadratna elektroda gdje su signali nešto niži nego u okolici.

Dodatak B: Prostorna rezolucija i erf profil

Neka savršeno uzak snop upada na sredinu detektora i u detektoru proizvede prostornu distribuciju signala oblika

$$o(x) = A_o \exp\left(-4 \ln 2 \cdot \frac{x^2}{w^2}\right)$$

gdje je w puna širina na pola maksimuma danog gaussijana. U slučaju da $o(x)$ uzmemo kao odaziv detektora za amplitudu A_o vrijedi

$$A_o = \frac{2\sqrt{\ln 2}}{w\sqrt{\pi}}.$$

Sken savršeno uskim snopom od točke $x = a$ do točke $x = b$ ima oblik

$$p(x) = A_p \mathbf{1}_{[a,b]}(x)$$

gdje funkcija $\mathbf{1}_{[a,b]}(x)$ poprima vrijednost 1 u intervalu $[a, b]$, a 0 inače. Signal u detektoru je onda konvolucija pobude i funkcije odaziva

$$s(x) = \int_{-\infty}^{+\infty} o(x-z)p(z)dz.$$

Uvrstimo sken i funkciju odaziva

$$s(x) = A_o A_p \int_a^b \exp\left(-4 \ln 2 \cdot \frac{(x-z)^2}{w^2}\right) dz$$

te izvrjednimo integral uz korištenje normalizacije za A_o pa dobijemo

$$s(x) = \frac{A_p}{2} \left(\operatorname{erf}\left(2\sqrt{\ln 2} \frac{x-c+W/2}{w}\right) - \operatorname{erf}\left(2\sqrt{\ln 2} \frac{x-c-W/2}{w}\right) \right)$$

gdje je $\operatorname{erf}(x)$ funkcija greške (eng. error function). Također smo uveli pokrate $c = (b+a)/2$ i $W = b-a$ odnosno za položaj centra skena i punu širinu na pola maksimuma. Dobili smo oblik erf profila. Parametar w odgovara onoj početnoj FWHM tj. prostornoj rezoluciji detektora. Druga korištena mjera rezolucije je, Δx_{10-90} , porast od 10% na 90% maksimuma na rubu. Veza između mjera razlučivanja, kada je $W > 2w$, je dana s $\Delta x_{10-90} = \alpha \cdot w$ gdje je α rješenje jednadžbe $\operatorname{erf}(\alpha\sqrt{\ln 2}) = 4/5$ te iznosi $\alpha \approx 1.0884$.